

Trajectoire technologique et industrielle : accélérer la mise à l'échelle pour améliorer la compétitivité de l'**hydrogène zéro carbone**

Laurent Carme est directeur général de McPhy, groupe industriel spécialiste des équipements de production et distribution d'hydrogène zéro carbone (électrolyseurs et stations de recharge).

Le groupe est en particulier actif sur le passage à l'échelle des technologies hydrogène pour les applications industrielles et de mobilité, ainsi qu'en projets.

1 Les usages actuels de l'hydrogène

Utilisé depuis plusieurs décennies, notamment sur le secteur industriel, le marché de l'hydrogène est aujourd'hui une réalité en pleine croissance. Cent-dix millions de tonnes d'hydrogène sont consommées chaque année en France, essentiellement pour des applications industrielles. Un certain nombre d'applications dans la mobilité et l'énergie sont également promises à un brillant avenir. Cela devrait se traduire par un quasi triplement des volumes d'hydrogène produits au cours des prochaines décennies (*Figure 1*).

Les techniques de production qui seront mises en œuvre pour produire cet hydrogène auront un impact sur le potentiel de décarbonation de l'énergie hydrogène et sur sa contribution à la réalisation de l'objectif de neutralité carbone fixé à 2050.

Dans l'industrie, les usages de l'hydrogène se concentrent essentiellement dans quatre domaines (*Figure 2*) :

- le premier est la raffinerie, où le rôle de l'hydrogène est de retirer un certain nombre d'impuretés dans le pétrole ;
- la chimie, avec notamment la production d'ammoniac ;
- pour la production de méthanol, l'hydrogène est également un composé essentiel ;
- les productions d'acier.

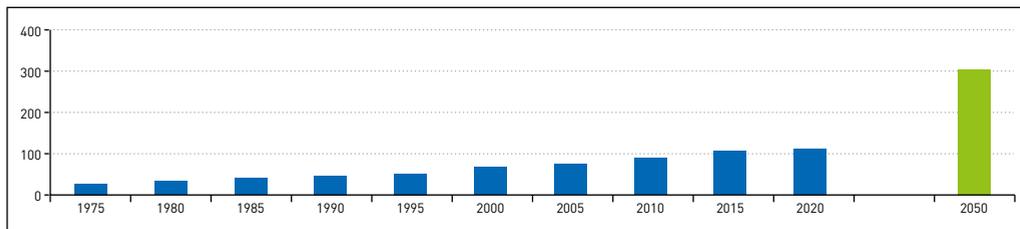


Figure 1
 Demande mondiale en hydrogène depuis 1975 (en Mth₂/an) en prédiction de la demande en 2050.
 Source : IEA 112019, Deloitte.

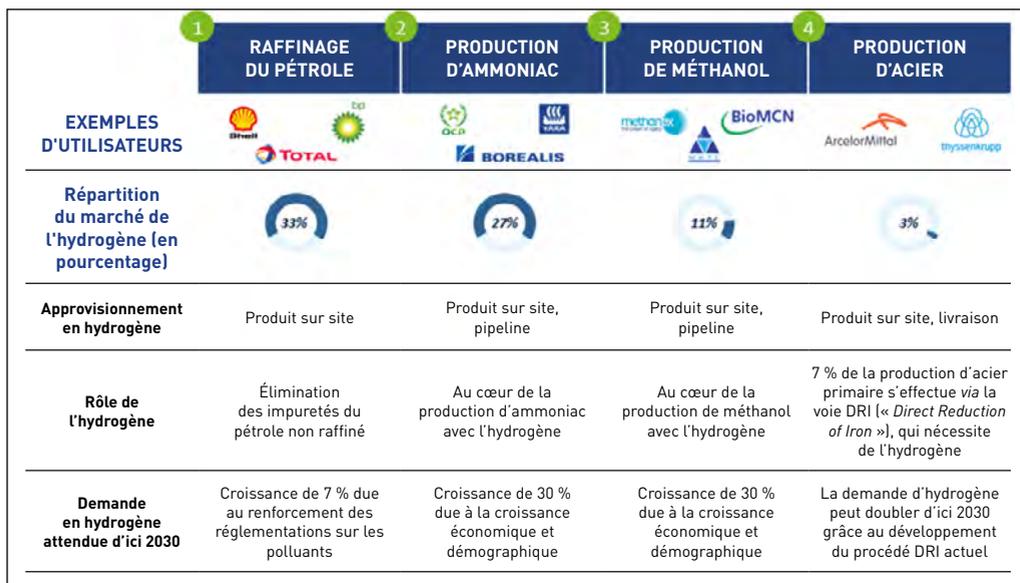


Figure 2
 Détails de la part et de l'utilisation de l'hydrogène dans les différentes industries majoritaires. La raffinerie est le marché le plus important pour l'hydrogène, suivi par les secteurs de la chimie et de l'industrie. Dans le premier, on peut prévoir une croissance de 7 % due au renforcement des politiques environnementales à l'avenir. Dans les secteurs chimiques, on envisage une augmentation de 30 % due à la croissance économique et démographique. La production d'hydrogène pour l'industrie de l'acier pourrait doubler d'ici 2030 grâce au procédé DRI (« Direct Reduction of Iron »), procédé de réduction du fer visant à transformer le fer en poudre ou petites boulettes.
 Source : IEA, 2019.

Ces quatre industries sont au cœur de nos économies et pour maintenir une souveraineté industrielle et technologique tout en concourant à la réalisation des objectifs climatiques, la décarbonation de l'hydrogène est un enjeu majeur.

Les applications mobilités posent aussi un enjeu de décarbonation majeur qui concerne

tous types de véhicules, du véhicule utilitaire ou de la berline citadine, jusqu'à la mobilité lourde comme les bus, bennes à ordures, camions, ou encore les mobilités lourdes en cours de développement à long terme comme le train, le bateau et l'avion, sur lesquels la France se positionne (Figure 3).

Nous assistons au développement de flottes hydrogène

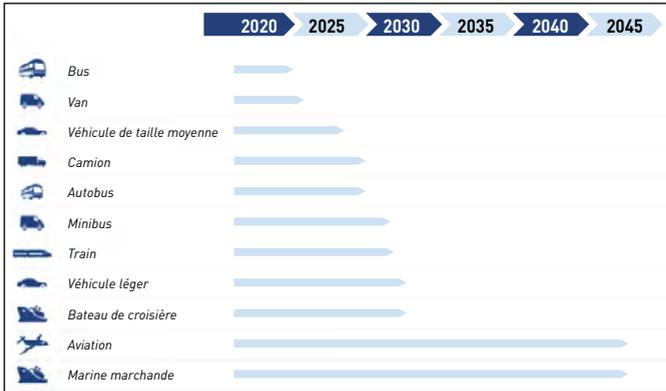


Figure 3

Estimation de la date d'entrée sur le marché des moyens de mobilité fonctionnant à l'hydrogène. La mobilité hydrogène se développe notamment grâce aux flottes captives de véhicules électriques.

Source IEA, 2019, Hydrogen Europe.

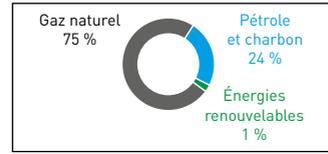


Figure 4

Répartition des sources de production de l'hydrogène en 2019 dans le monde. 99 % de l'hydrogène est produit à partir de ressources fossiles. Cette année-là, 115 Mt ont été produites.

Source : IEA, 2019.

dans les différents pays du globe, l'Europe n'étant pas en reste avec un tandem France-Allemagne comme fers de lance. Rappelons que la France a lancé au mois de septembre 2020 un plan national hydrogène ambitieux doté de 7 milliards d'euros d'ici 2030.

C'est un processus qui est bien établi, efficace et relativement peu onéreux, de l'ordre de 1 à 2 euros par kilogramme d'hydrogène produit (Figure 5).

Cette technique de production, bien que très compétitive, a l'inconvénient d'émettre une quantité de CO₂ non

2 Les enjeux de la filière hydrogène

L'hydrogène est aujourd'hui produit essentiellement à partir d'hydrocarbures (gaz naturel, charbon) (Figure 4).

Le procédé le plus utilisé est ce qu'on appelle le SMR (« Steam Methane Reformer »¹).

1. SMR (« Steam Methane Reformer »), ou vapocraquage du méthane, ou vaporeformage, est le procédé consistant à faire réagir une molécule de méthane avec une molécule d'eau à fortes pression et température pour produire trois molécules d'hydrogène et une molécule de monoxyde de carbone.

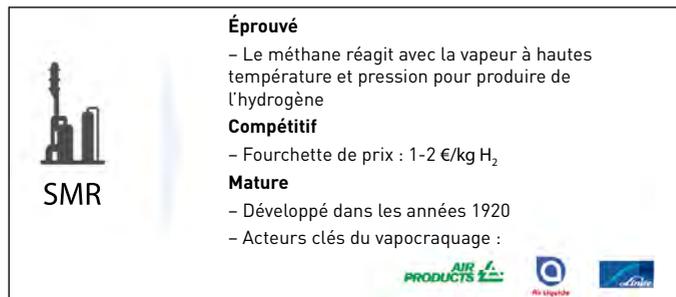


Figure 5

SMR (« Steam Methane Reformer ») ou vapocraquage est le procédé industriel le plus commun pour la production d'hydrogène développé dans les années 1920. C'est une réaction chimique à haute température et haute pression qui permet de produire de l'hydrogène à un coût très compétitif.

Source : IEA, 2019.

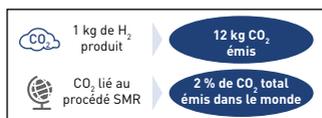


Figure 6

Chaque année, la production d'hydrogène par le procédé SMR est responsable d'importantes émissions de CO_2 .

Source : IEA, 2019.

négligeable. Pour chaque kilogramme d'hydrogène produit, il est communément admis que 12 kilogrammes de CO_2 sont rejetés dans l'atmosphère. Cet hydrogène, dit « gris », serait ainsi responsable d'environ 2 % des émissions de gaz à effet de serre dans le monde, soit l'équivalent de la pollution générée par le transport aérien (Figure 6). Face à ce constat, la filière hydrogène dans son ensemble se modernise pour verdir les procédés de production d'hydrogène pour lutter contre le réchauffement climatique.

L'une des options consiste à capturer le CO_2 émis lors de la production pour soit le réutiliser (sous forme de CO_2 ou converti en méthanol de synthèse par exemple), soit l'injecter en réservoir et le stocker (Figure 7).

Cette solution est pertinente sur une échelle moyen terme, notamment pour décarboner

les bases installées de SMR qui sont extrêmement importantes aujourd'hui dans le monde. En revanche, elle ne représente pas une approche totalement zéro carbone.

3 L'électrolyse, pierre angulaire pour décarboner la production d'hydrogène

Face aux enjeux de décarbonation de la filière hydrogène, la solution privilégiée aujourd'hui par l'industrie est l'électrolyse²

2. Lors d'une électrolyse, la molécule d'eau H_2O est soumise à un courant électrique au travers de deux électrodes (anode et cathode), celle-ci se dissocie en dioxygène et dihydrogène gazeux. Le courant électrique dissocie la molécule d'eau en ions hydroxyde HO^- à la cathode et en protons H^+ à l'anode. Les protons acceptent des électrons dans une réaction d'oxydation en formant de l'hydrogène gazeux selon l'équation $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$.

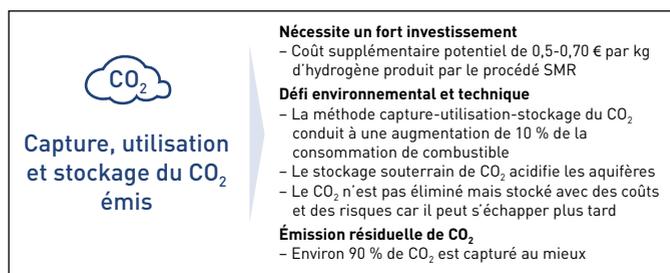


Figure 7

La capture et le stockage du CO_2 émis (CCUS) est une technologie permettant d'éviter l'émission de CO_2 du procédé SMR. Cependant, le coût est majoré d'environ 0,5/0,70 € par kilogramme d'hydrogène produit. D'autres défis techniques viennent s'ajouter : la méthode capture-utilisation-stockage du CO_2 ou séquestration du CO_2 conduit à une augmentation de 10 % de la consommation de combustible et acidifie les aquifères. Par ailleurs, le CO_2 n'est pas éliminé mais stocké avec des coûts et des risques car il peut s'échapper plus tard. Cette méthode permet néanmoins de capturer jusqu'à 90 % du CO_2 .

Source : IEA, 2019.

de l'eau, processus bien connu visant à utiliser l'énergie fournie par l'électricité pour casser la molécule d'eau et émettre à la fois de l'hydrogène et de l'oxygène (*Figure 8*).

L'oxygène ainsi libéré peut être soit réutilisé dans d'autres processus industriels soit être ventilé sans impact pour l'environnement. Quant à l'hydrogène produit, il peut être valorisé dans des applications industrielles, de mobilité ou d'énergie.

Le processus de l'électrolyse est bien connu des physiciens et des chimistes, et plusieurs facteurs nous font constater une accélération de la filière, et envisager aujourd'hui un passage rapide à l'échelle industrielle.

Le premier de manière assez évidente, est la sensibilité aux problématiques climatiques de la part des citoyens mais aussi de la part des politiques, ce qui se traduit dans les ambitions, les objectifs affichés par tous et traduits dans la loi. Le deuxième élément fondamental est celui de l'indépendance énergétique. Industrialiser la technologie de l'électrolyse pour produire de l'hydrogène bas carbone nécessite de

disposer de sources d'énergie électrique bas carbone à la fois abondantes et économiques. C'est le cas en France avec le nucléaire d'une part, mais également avec la croissance exponentielle des énergies renouvelables à la fois solaire et éolienne, qui au cours des dernières années se sont très fortement industrialisées. Ces énergies renouvelables commencent à représenter une part significative du mix énergétique et atteignent une compétitivité intéressante. Leur développement est corrélé au développement des projets en électrolyse.

La *Figure 9* montre l'évolution du nombre de projets et de la taille moyenne de ces projets au cours des vingt dernières années. Nous constatons une croissance extrêmement forte qui se traduit notamment par des projets de taille plus importante. Ces vingt premières années du siècle ont vu des projets d'électrolyseurs de taille moyenne, inférieure à un mégawatt. Aujourd'hui, des premiers projets à l'échelle multi-mégawatt sont en cours d'implémentation (de l'ordre de 20 mégawatts), ainsi que

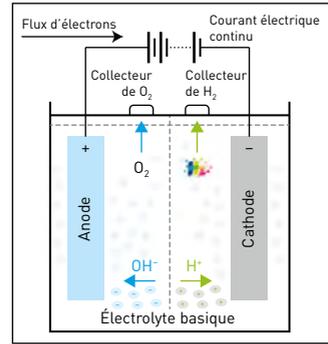


Figure 8

Schéma du principe de l'électrolyse pour la production d'hydrogène.

Source : IEA, 2019, The American Society of Mechanical Engineers.

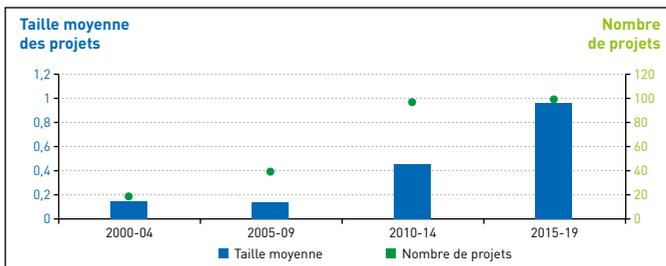


Figure 9

Évolution du nombre de projets d'implantation d'électrolyseurs (en vert) et puissance moyenne fournie par les électrolyseurs (en bleu).

Source : IEA, 2019.

le lancement de projets beaucoup plus ambitieux (de l'ordre de 100 MW et plus). Ce type de projet multi-MW, voire GW, représente un jalon indispensable pour pouvoir décarboner massivement l'industrie.

4 Stratégie d'industrialisation

Les quantités d'hydrogène produites par électrolyse sont encore relativement faibles en proportion, et leur coût reste relativement élevé. Cependant, l'expérience acquise depuis plusieurs décennies, notamment à travers l'industrialisation des énergies renouvelables, à travers des processus industriels classiques d'économies d'échelle, nous montre que cette phase d'industrialisation, bien que critique, est un maillon indispensable à la trajectoire de décroissance des coûts. S'en est suivi un décollage extrêmement fort du nombre de MW installés en solaire et en éolien

(Figure 10), et en même temps une baisse spectaculaire des coûts (Figure 11).

Nous constatons à l'heure actuelle des appels d'offres, en Espagne notamment, sur le solaire où le coût d'électricité est de l'ordre de 20 € par mégawattheure. L'éolien offshore de la mer du Nord est aujourd'hui de l'ordre de 40 € par mégawattheure, donc extrêmement compétitif et souvent même plus performant que les énergies fossiles.

En termes de technologies de production d'hydrogène (« électrolyseurs »), aujourd'hui deux technologies sont matures et peuvent être considérées pour cette industrialisation : il s'agit du PEM³, technologie utilisant des

3. PEM (« Proton Exchange Membrane ») : technique d'électrolyse dans laquelle l'électrolyte est une membrane polymère échangeuse de protons. Cette dernière est perméable aux ions mais imperméable aux gaz permettant ainsi de récupérer l'hydrogène produit.

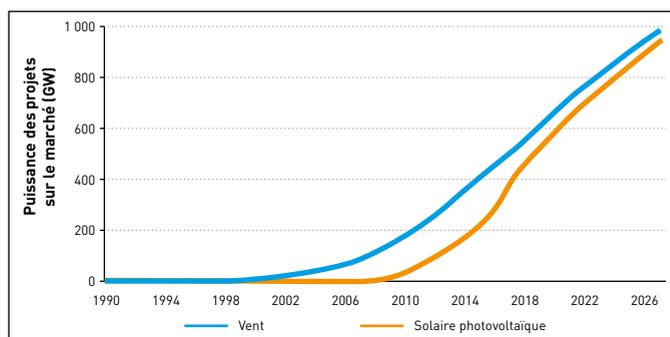


Figure 10

Évolution des dimensions des projets d'installation de panneaux solaires photovoltaïques et d'éoliennes depuis 1990, et projection pour 2026. L'augmentation très rapide de ces deux marchés de l'énergie en vingt ans permet de penser qu'il en sera de même pour le marché de l'hydrogène zéro carbone.

Source : IEA 2019, Company.

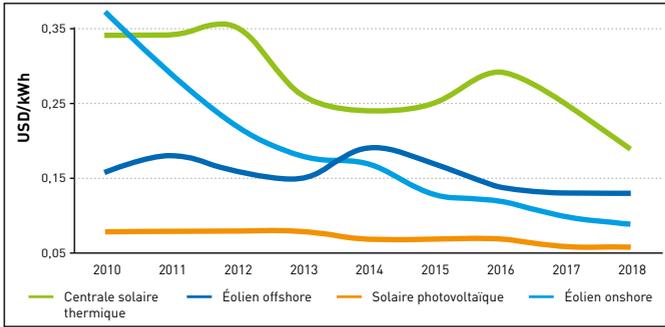


Figure 11

Évolution de coût actualisé de l'électricité* entre 2010 et 2018 pour les centrales solaires, le solaire photovoltaïque, l'éolien terrestre et en mer (en USD/kWh). En dix ans, le coût du photovoltaïque s'est effondré de 75 %. Par ailleurs, les besoins en électricité représentent 80 % des coûts de production de l'hydrogène zéro carbone, donc plus les énergies renouvelables sont compétitives, plus l'hydrogène zéro carbone deviendra compétitif.

*Le coût actualisé de l'électricité (LCOE en anglais) est un ratio permettant de calculer le coût réel du système d'exploitation sur toute sa durée de vie. Il prend en compte les coûts d'investissements, les coûts de financements actualisés, les coûts d'opérations et de maintenances.

Sources : IEA 2019, Company.

membranes, et de la technologie de l'électrolyse alcaline⁴ dans laquelle s'est spécialisé le groupe McPhy.

Il est intéressant de constater que lorsque l'on considère le nombre de projets envisagés en Europe sur les prochaines années, le PEM représente à peu près les trois quarts de ce qui est envisagé en termes de nombre de projets, contre 25 % du nombre de projets pour l'alcalin. En revanche, lorsque l'on regarde les chiffres sous l'angle de la

puissance installée (nombre de MW), l'alcalin représente les trois quarts des capacités envisagées par les industriels dans les prochaines années (Figure 12), ce qui démontre que l'électrolyse alcaline est aujourd'hui la technologie de production d'hydrogène privilégiée pour les projets de très grande capacité, préfigurant le passage à l'échelle industrielle de la filière.

L'alcalin est extrêmement bien positionné sur cette problématique en raison d'une part de sa maturité – c'est une technologie qui est prouvée et qui a démontré à la fois sa résilience et sa stabilité au cours du temps –, et d'autre part de sa compacité. En utilisant l'alcalin haute pression (sous 30 bars par exemple, comme

4. La technologie alcaline (« *pressurized alkaline technology* ») est une technique d'électrolyse à haute pression utilisant un électrolyte très concentré, permettant de casser la molécule d'eau par de l'électricité, produisant ainsi de l'hydrogène.

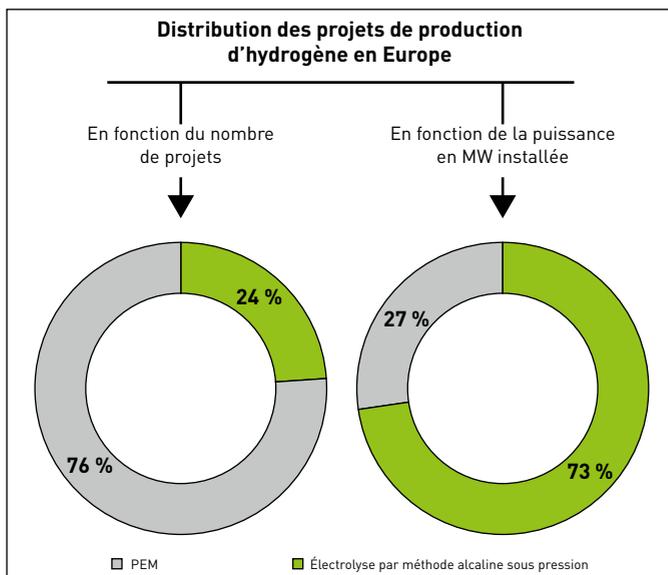


Figure 12

Distribution des dispositifs de production d'hydrogène en Europe en fonction de la technologie en termes de nombre de projets (à gauche) et en termes de dimension de projets (à droite). La technologie alcaline est la technologie privilégiée par les grands donneurs d'ordre du secteur pour répondre à la problématique de décarbonation de l'hydrogène à grande échelle.

Source : Hydrogen Europe, Clean Hydrogen Monitor 2020, oct. 2020.

les électrolyseurs McPhy) ; les donneurs d'ordre du secteur retrouvent un niveau de compacité compétitif par rapport à d'autres technologies comme le PEM. Par ailleurs, l'alcalin s'affranchit beaucoup plus que le PEM de la dépendance aux métaux précieux tel que l'iridium et permet donc de proposer une technologie beaucoup moins dépendante de la volatilité de ces métaux. Enfin, il présente une capacité d'intégration excellente avec les énergies renouvelables solaires et éoliennes grâce à une très grande flexibilité et à sa capacité de participation aux réserves primaires et secondaires. En résumé : aujourd'hui deux technologies

sont en cours d'industrialisation, le PEM plutôt orienté vers les petites capacités et l'alcalin permettant de répondre aujourd'hui aux enjeux de passage à l'échelle d'électrolyseurs de grandes capacités pour les applications industrielles.

5 McPhy, un acteur leader dans la production d'hydrogène décarboné

McPhy est un groupe industriel pionnier sur le marché de l'hydrogène, positionné à la fois sur les équipements de production d'hydrogène (électrolyseurs) et sur les stations

de recharge, avec une concentration sur les projets de très grande capacité, permettant d'adresser la totalité du marché et les secteurs de l'industrie, la mobilité et l'énergie.

Le chiffre d'affaires de près de 14 millions d'euros sur l'année 2020 (Figure 13) est en forte croissance par rapport à 2019 (20 % de croissance). Le carnet de commandes a quant à lui crû de 75 % par rapport à l'année 2019 pour atteindre 23 millions d'euros.

Des moyens importants sont mobilisés pour matérialiser le passage à l'échelle, notamment grâce au succès de l'augmentation de capital au mois d'octobre 2020, qui a permis au groupe de lever 180 millions d'euros pour accélérer sa croissance. De nouveaux investisseurs sont entrés au capital et apportent un support financier et technique. La société comptait fin 2020, 110 collaborateurs, présents dans trois pays (en France, qui représente la moitié des effectifs, en Allemagne et en Italie), ce qui est un point absolument majeur dans la construction européenne d'une filière hydrogène. 44 MW et 35 stations hydrogène McPhy

sont actuellement en cours de développement, en cours d'installation ou déjà installées sur le territoire européen.

La stratégie de « scale-up » de McPhy s'articule autour de quatre piliers stratégiques (Figure 14) :

- premier pilier : investir dans la technologie. McPhy investit en recherche et innovation pour maintenir son leadership technologique, en optimisant les performances de ses équipements aux meilleurs niveaux de qualité, de sécurité et de compétitivité coûts ;

- deuxième pilier : bâtir des références solides. C'est un point majeur, à la fois pour démontrer la capacité du groupe à adresser les projets de grande capacité, mais également pour faciliter le financement de projets de très grande capacité en se référant aux références emblématiques installées.

Matérialisant ce changement d'échelle, le groupe McPhy a été sélectionné pour un projet de 20 MW au nord des Pays Bas pour le compte des sociétés Nouryon&Gasunie, un des plus gros projets en cours de développement en Europe. Avec ses partenaires TSM et



Figure 13

Le chiffre d'affaires McPhy en 2020 s'élevait à 13,7 millions d'euros. Les revenus de l'entreprise sont réalisés à 60 % avec la technologie des électrolyseurs et à 40 % par le segment des stations hydrogène.

Source : McPhy.



Figure 14

Les quatre piliers principaux de développement pour McPhy : la technologie de pointe, les références, la compétitivité et les ressources humaines.

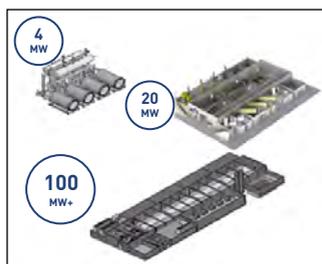


Figure 15

Trois exemples de projets d'électrolyseurs développés par McPhy.

Source : McPhy.

Ataway, McPhy a remporté un des plus gros marchés de mobilité en Europe, avec une contribution majeure au projet « *Zero Emission Valley* » ;

– troisième pilier : améliorer la compétitivité. Cela se traduit par un travail sur les économies d'échelle et la réduction des coûts, notamment grâce à une augmentation des capacités de production. Dans cette optique, McPhy a pour projet, actuellement à l'étude, de construire une usine d'électrolyseurs d'une capacité de 1 GW en France. La décision finale d'investissement devrait intervenir d'ici fin 2021. Le groupe étoffe également ses capacités de production de stations hydrogène, avec un nouveau site industriel en France, d'une capacité de production de cent stations par an ;

– dernier pilier : l'équipe et les talents McPhy. McPhy se positionne sur une toute nouvelle industrie. L'un des défis est de professionnaliser les compétences, recruter des talents et pouvoir les former pour asseoir la pérennité de l'entreprise ; tout en structurant l'organisation pour réussir la montée en puissance. À ce titre, le groupe prévoit de recruter plus d'une cinquantaine de collaborateurs cette année (soit + 50 %) tant en France qu'en Allemagne et en Italie afin de répondre aux demandes des marchés.

6 Réalisations et ambitions de la filiale

Citons quelques exemples de passage à l'échelle.

Le design des électrolyseurs McPhy est un concept modulaire/modularisé, qui facilite

beaucoup l'approche d'économie d'échelle. La brique « technologique » au cœur de l'électrolyseur est ce qu'on appelle le stack⁵ (Figure 15).

Les stacks représentés sur la figure sont assemblés en série pour créer un module de 4 MW qui va pouvoir être déployé sur des équipements de tailles beaucoup plus importantes (20 MW, par exemple), sur le projet des Pays-Bas ; et sur des modules de tailles beaucoup plus importantes (100 MW par exemple) demain.

McPhy investit également en recherche et innovation pour proposer des stacks de plus hautes capacités permettant encore d'améliorer la compacité et la performance du système. Même approche sur les stations de recharge : les stations de recharge classiques aujourd'hui sont des stations de l'ordre de 200 à 400 kg telles que McPhy les implémente sur les projets « *Zero Emission Valley* » en Auvergne-Rhône-Alpes avec la société Himpulsion (rappelons que McPhy est en consortium avec les sociétés TSM-HRS et Ataway sur ce projet), « AUXR_H2 » avec la société Hynamics à Auxerre, ou « Dijon Métropole Smart Energy » avec la société Rougeot à Dijon. La taille de ces équipements est amenée à croître pour permettre le déploiement des infrastructures adaptées aux applications de mobilité lourdes : camions, bateaux, trains, avions. À ce titre, McPhy dispose d'un certain nombre de brevets, notamment d'une architecture brevetée « *Augmented*

5. Stack : pile, ici une unité de l'électrolyseur.

McFilling » (Figure 16) pour les stations de plus de 2 tonnes par jour, qui permettront de répondre aux besoins à venir sur la mobilité lourde intensive. En termes de référence (Figure 17), McPhy dispose de

44 MW d'électrolyseurs répartis sur toute l'Europe et de 35 stations de recharge en cours de développement, en cours d'installation ou installées. Cela fait partie des bases les plus importantes.

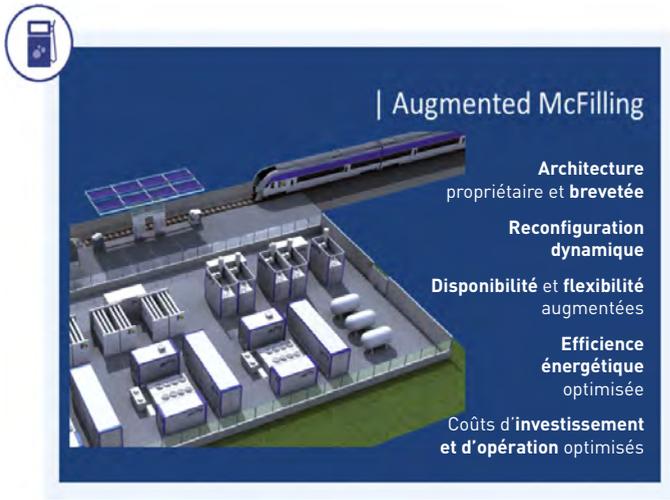


Figure 16

Le projet « Augmented McFilling » vise le développement des stations à hydrogène pour les véhicules de deux tonnes et plus. C'est une technologie brevetée et exclusive qui se veut flexible, efficace et optimisée pour reconfigurer la mobilité sur le territoire.

Source : McPhy.



Figure 17

La répartition des installations d'électrolyseurs en bleu et des stations à hydrogène en vert sur le territoire européen.

Source : McPhy.

La matérialisation du « passage à l'échelle »

Un passage à l'échelle important s'est amorcé sur 2020 pour toute la filière et en particulier, pour McPhy. Il va se poursuivre en 2021 grâce aux financements annoncés par l'Union européenne et les différents pays européens (dont la France) sur la filière hydrogène. En France, ce sont 7 milliards d'euros qui seront investis sur la période 2020-2030 pour développer une filière hydrogène vert compétitive à l'échelle des marchés, à la fois supporter des projets de grandes envergures et soutenir le développement des acteurs industriels comme McPhy. Tous ces développements exigent la matérialisation de nombreux passages à l'échelle (projets, technologies, infrastructure industrielle), sur lesquels les hommes et les femmes de McPhy sont aujourd'hui pleinement mobilisés (*Figure 18*).

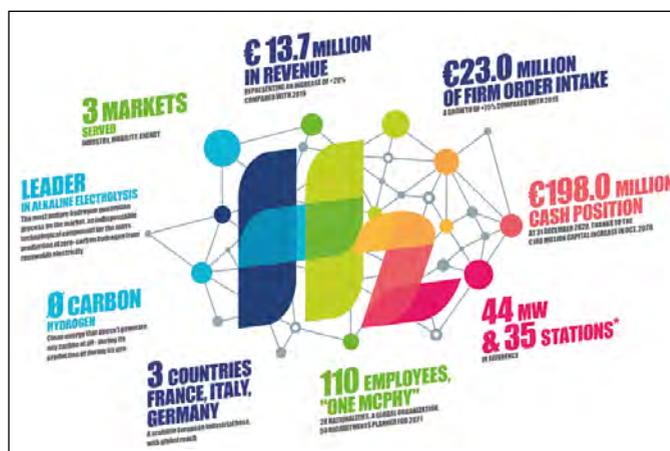


Figure 18

Les chiffres clés de l'entreprise McPhy.

Source : McPhy.